文章编号:1000-4939(2024)06-1394-09

水玻璃模数对地聚物再生混凝土尺寸效应的影响

丁兆洋[1],周静海[1],苏群[1],孙红[1],张逸超[1],王晴[2]

(1. 沈阳建筑大学土木工程学院,110168 沈阳;2. 沈阳建筑大学材料科学与工程学院,110168 沈阳)

摘　要:设计了 4 种不同边长立方体(70、100、150 和 200 mm)和 9 种不同水玻璃模数(0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4 和 2.7)的地聚物再生混凝土试件,研究了不同水玻璃模数条件下的地聚物再生混凝土的抗压强度及其尺寸效应。通过试验发现:水玻璃模数过低导致地聚物胶凝材料无法凝结,地聚物再生混凝土没有强度;水玻璃模数过高导致地聚物胶凝材料闪凝,地聚物再生混凝土也没有强度。通过微观分析发现,地聚物中存在两种结构的水化产物,随着水玻璃模数的降低,两种水化产物逐渐密实,其强度也逐渐提高。通过对地聚物再生混凝土的尺寸效应研究发现地聚物再生混凝土的换算系数不能采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定的换算系数,给出 2 种方法来进行地聚物再生混凝土尺寸换算系数的取值,第 1 种是平均数方法,第 2 种方法为线性拟合法。边长为 200、150 和 100 mm 的地聚物再生混凝土立方体试件抗压强度均符合 BAŽANT 的尺寸效应理论曲线,采用无量纲的方法可以得到地聚物再生混凝土抗压强度与水玻璃模数和尺寸参数耦合作用影响的预测方程,并且得出了不同水玻璃模数条件下地聚物再生混凝土的临界尺寸和临界强度值。

关键词:地聚物再生骨料混凝土;水玻璃模数;抗压强度;尺寸效应

中图分类号:TU528　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.06.020

Influence of sodium silicate module on size effect of geopolymer recycled aggregate concrete

DING Zhaoyang[1], ZHOU Jinghai[1], SU Qun[1], SUN Hong[1], ZHANG Yichao[1], WANG Qing[2]

(1. School of Civil Engineering, Shenyang Jianzhu University, 110168 Shenyang, China;
2. School of Material Science and Engineering, Shenyang Jianzhu University, 110168 Shenyang, China)

Abstract: The effect of sodium silicate module (0.3、0.6、0.9、1.2、1.5、1.8、2.1、2.4 and 2.7) on the size effect of geopolymer recycled aggregate concrete was studied by four different size specimens (70, 100, 150, and 200 mm). The results show that the conversion coefficient of geopolymer recycled aggregate concrete cannot be used as specified in GB/T 50081—2002 Standard for Testing Methods for Mechanical Properties of Ordinary Concrete. In this study, two methods were used to evaluate the size conversion coefficient of regenerated aggregate concrete. The first method was the mean method, while the second method

收稿日期:2022-11-23　　**修回日期**:2023-01-13
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51678374);辽宁省教育厅服务地方资助项目(No. LJKFZ20220226);硅酸盐建筑材料国家重点实验室(武汉理工大学)开放基金资助项目(No. SYSJJ2020-15)
通信作者:周静海,教授。E-mail:zhoujinghai@sjzu.edu.cn
引用格式:丁兆洋,周静海,苏群,等. 水玻璃模数对地聚物再生混凝土尺寸效应的影响[J]. 应用力学学报,2024,41(6):1394-1402.
DING Zhaoyang, ZHOU Jinghai, SU Qun, et al. Influence of sodium silicate module on size effect of geopolymer recycled aggregate concrete [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2024, 41(6):1394-1402.

was linear fitting method. The compressive strength of recycled aggregate concrete of 200,150 and 100 mm are in line with the BAŽANT's theory of size effect curve, adopt the method of dimensionless can get polymer compressive strength of recycled aggregate concrete and sodium silicate module and size parameters of the prediction equation of coupling effect, the applicability of the proposed equation is better, and it is concluded that the different conditions of recycled aggregate beneath gathered the strength of recycled aggregate concrete critical size and critical value.

Key words: geopolymer recycled aggregate concrete; sodium silicate module; compressive strength; size effect

地聚物(geopolymer)是一种新型胶凝材料,由法国材料学家 DAVIDOVITTS 于 1978 年提出[1],其主要原料为矿渣、粉煤灰、硼泥、硅灰等含有 SiO_2、Al_2O_3、CaO 成分的工业废弃物。已有研究表明,作为水泥替代品,地聚物具有良好的力学性能、稳定的耐久性能、耐高温性能及耐腐蚀性能[2-5]。

关于再生骨料混凝土的研究已进展多年,其力学性能已得到充分的认识[6-9],采用再生骨料替代自然石材会略微牺牲相关构建的强度和耐久性,但其环保意义却极为显著。

地聚物再生混凝土可以将工业废渣、废弃混凝土等工业废弃物进行循环利用,消除了环境与发展之间的尖锐冲突,是一种绿色环保的新型建筑材料。目前地聚物再生混凝土的研究局限于实验室层面,这种材料在实验室测得的小尺寸试件的强度对实际工程的指导意义和实用性如何还鲜有研究,虽然可以参考普通水泥混凝土尺寸效应的相关数据和理论,但是由于所用骨料与天然骨料存在差异,胶凝材料也非传统的水泥,地聚物再生混凝土的尺寸效应是否符合普通水泥混凝土的尺寸效应还需进一步验证。本研究采用碱激发工业废渣的方法制备地聚物作为胶凝材料替代水泥,采用废弃混凝土作为骨料替代自然石材,制备地聚物再生混凝土。采用不同模数的水玻璃激发地聚物是目前的常用手段,本研究通过研究不同水玻璃模数下地聚物再生混凝土的抗压强度、强度标准差和尺寸换算系数,验证地聚物再生混凝土是否符合经典的 BAŽANT 尺寸效应理论;并求出不同水玻璃模数下地聚物再生混凝土的临界尺寸和临界强度,为地聚物再生混凝土在实际工程中的应用提供理论指导和数据支撑。

1　原材料及试验方法

试验用高炉矿渣采用鞍山钢铁股份有限公司所生产的粒化高炉矿渣粉,经检验,符合《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046—2000)标准要求。粉煤灰选用本溪的一级粉煤灰,其性能指标符合《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2005)标准要求,矿渣和粉煤灰的主要化学成分见表 1。水玻璃选用山东优索化工科技有限公司生产的水玻璃溶液,原始模数为 3.3,波美度为 40,其化学成分见表 2。再生骨料为废弃混凝土,经人工破碎成最大粒径为25 mm且具有连续级配的再生混凝土粗骨料,砂子为天然中细河砂。

表 1　矿渣和粉煤灰的化学组成

Tab.1　Chemical composition of slag and fly ash

原料种类	各成分质量分数/%							烧失量/%
	氧化钙	二氧化硅	氧化铝	氧化铁	氧化镁	氧化钠	氧化钾	
矿渣	43.10	32.26	14.69	2.06	6.19	–	–	0.97
粉煤灰	5.51	48.54	28.35	6.37	2.42	3.01	3.90	0.96

根据课题组的前期研究[10],本试验所用的地聚物胶凝材料采用强度最佳配合比,液胶比为 0.5,通过改变粉煤灰和矿渣的用量来调整原料中的氧化物摩尔比,使 $n(CaO+MgO):n(SiO_2+Al_2O_3)=1.0$,碱性激发剂采用不同模数的水玻璃溶液,水玻璃模数通过在水玻璃溶液中添加 NaOH 实现,制备的地聚物再生混凝土具体配合比见表 3。

表 2　水玻璃的化学组成

Tab.2　Chemical composition and property of sodium silicate

质量分数/%			水玻璃模数	pH 值	密度/($g\cdot cm^{-3}$)
Na_2O	SiO_2	H_2O			
7.96	26.1	66	3.3	13.1	1.47

将地聚物再生混凝土制备成边长为 70、100、150 和 200 mm 的立方体试件,每种尺寸和配比的试件共做 6 个,共计 216 个试件,测试其 28 d 龄期的抗压强度值。抗压强度测试仪器选用深圳瑞格尔仪器有限公司生产的 RGM-100A 型微机控制万能试验机。X 射线衍射仪采用岛津株式会社的 XRD-7000 型;扫描电子显微镜采用日立株式会社的 4800 型冷场发射扫描电子显微镜。

表 3 不同水玻璃模数地聚物再生混凝土配合比(单位:$kg \cdot m^{-3}$)

Tab 3 Mixture ratio of geopolymer recycled aggregate concrete with different sodium silicate module(unit:$kg \cdot m^{-3}$)

水玻璃模数	矿渣含量	粉煤灰含量	氢氧化钠含量	水玻璃含量	水的含量	砂含量	再生骨料含量
0.3	452	113	131.1	113	170	847	1 050
0.6	452	113	65.5	113	170	847	1 050
0.9	452	113	43.7	113	170	847	1 050
1.2	452	113	32.8	113	170	847	1 050
1.5	452	113	26.2	113	170	847	1 050
1.8	452	113	21.8	113	170	847	1 050
2.1	452	113	18.7	113	170	847	1 050
2.4	452	113	16.4	113	170	847	1 050
2.7	452	113	14.6	113	170	847	1 050

2 试验结果与分析

2.1 水玻璃模数对抗压强度的影响

水玻璃俗称泡花碱,是一种能溶于水的硅酸盐,由不同比例的碱金属和二氧化硅所组成。其内部结构为:以一个无定型的$(SiO_2)_m$为核心,表面上吸附了硅酸负离子 H_4SiO_4、$H_3SiO_4^-$,反离子的一部分 zNa^+吸附在紧密层内,另一部分或部分转变成硅凝胶,形成电双层结构,如图 1 所示[11]。

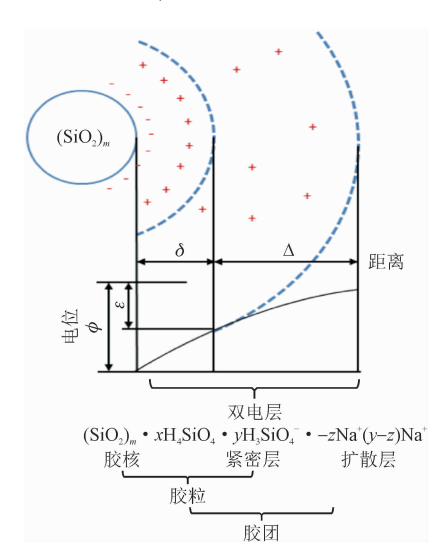


图 1 水玻璃内部的电双层结构[11]

Fig. 1 Double electron layer structure of sodium silicate[11]

水玻璃失水可导致硬化,其机理是随着水分的减少,当水玻璃达到临界浓度值后,溶剂化层被迫减薄,扩散层的 Na^+被迫回到紧密层,胶粒失去稳定性而聚结增大或凝成凝胶[12]。地聚物再生混凝土的拌和过程中,液体润湿胶凝材料和骨料后,水分被迅速吸收,导致水玻璃率先固化形成立体网状骨架的硅凝胶,也就是所谓的前驱体[13]。随着反应的进行,矿渣和粉煤灰表面被碱性环境激发出的游离的硅氧四面体和铝氧四面体迅速与前驱体相结合,逐渐生长,并相互连接,形成最初的骨架结构。骨架结构是否完整,直接影响了地聚物胶凝材料的强度。

通过向水玻璃溶液中添加 NaOH 可以改变水玻璃的模数,其实质上是改变了水玻璃的电双层结构[11],NaOH 添加的多,则水玻璃模数低,其扩散层更大,有更多的游离 Na^+和 OH^-,根据 PURDON[14]的"碱激活"理论和 DAVIDOVITS[4]的"解聚-缩聚"理论,矿物原料中的 Ca、Si 和 Al 离子由碱中的 OH^-和 Na^+激发出来,其中 Si、Al 离子可以形成硅氧四面体[SiO_4]和铝氧四面体[AlO_4],这些四面体在浓度达到饱和时汇聚到前驱体上并发生缩聚反应;Ca 离子也会和游离的 Si 离子形成水化硅酸钙凝胶,地聚物的水化产物中含有两种胶凝体,一种是具有三维网络结构的主要由硅和铝组成的类沸石及莫来石结构(N-A-S-H 结构),一种是主要由钙和硅形成的层状的水化硅酸钙结构(C-A-S-H 结构)[15],如图 2 所示。

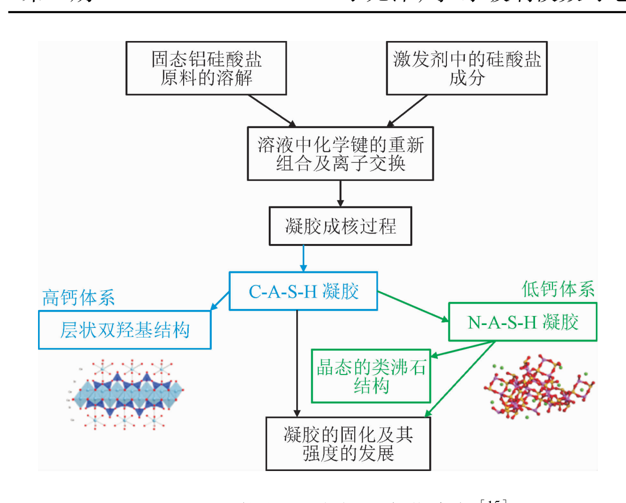


图 2　地聚物的两种主要水化产物[15]

Fig. 2　Two main hydration products of geopolymer[15]

图 3 为地聚物再生混凝土不同尺寸立方体试件的抗压强度与水玻璃模数的关系。当水玻璃模数过高时(M = 2.7),水玻璃的电双层结构过薄,没有足够的 Na^+ 和 OH^- 激发矿物原料,所以不凝结,无法形成强度;水玻璃模数过低时(M = 0.3)则缩聚反应提前发生,发生闪凝现象,强度极低或没有强度。当水玻璃模数从 2.4 逐渐降低到在 0.6 时,地聚物再生混凝土的抗压强度逐渐增加,这是由于随着水玻璃模数的降低,体系中的 Na^+ 和 OH^- 浓度逐渐增加,使得体系中可以被激发出更多的 Ca、Si 和 Al 离子,从而生成更多的类沸石和水化硅酸钙,导致水化产物的结构更加紧密和完整,地聚物再生混凝土强度逐渐增加。

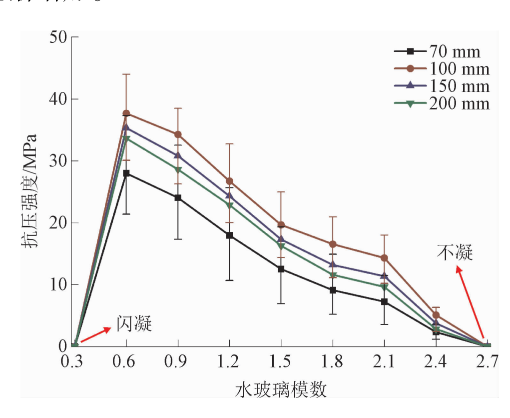


图 3　不同水玻璃模数和尺寸条件下的抗压强度

Fig. 3　Compressive strength on different sodium silicate module and size effect

由图 3 可知,不同尺寸与地聚物再生混凝土抗压强度的规律为:$f_{100} > f_{150} > f_{200} > f_{70}$,其总体规律为试件的尺寸越大,抗压强度越小,其中试件边长为 150、200 mm的立方体试件比边长为 100 mm 的立方体试件的平均强度降低了 12.7% 和 18.2%。这是由于所选用的再生骨料在加工过程中都会出现原始裂纹,体积大的试件需要更多的粗骨料,其内部的原始裂纹也多,导致其抗压强度降低。

对于边长为 70 mm 的立方体地聚物再生混凝土试件强度却不符合此规律,所有再生骨料掺量对应的边长为 70 mm 立方体试件的抗压强度最低。按照相关标准规定[16],粗骨料的最大粒径不能超过结构截面最小尺寸的 1/4,否则会影响混凝土的力学性能。当试件的边长为 70 mm 时,再生骨料的最大粒径(25 mm)显然已经超过边长的 1/4,这是产生这种现象的原因。

图 4 为水玻璃模数为 0.6、1.2、1.8 和 2.4 条件下,地聚物胶凝材料的 XRD 图谱。从图中可以看出,4 个样品的主要水化产物分别是水化硅酸钙(tobemorite 9A,PDF 卡片号:89-6458)、a 型含钙类沸石(zeolite, PDF 卡片号:38-0232)和莫来石(mulite, PDF 卡片号:74-2419)。可以看出,地聚物的水化产物存在两种凝胶结构,含钙的层状结构(C-A-S-H)和无钙的网状结构(N-A-S-H),随着水玻璃模数的降低,地聚物中的水化硅酸钙基本没有变化,而莫来石和类沸石逐渐增加,说明随着水玻璃模数的降低,地聚物的空间网络结构更加完整,其强度也逐渐加强。

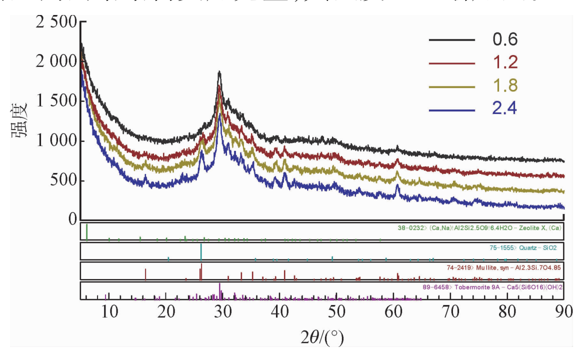
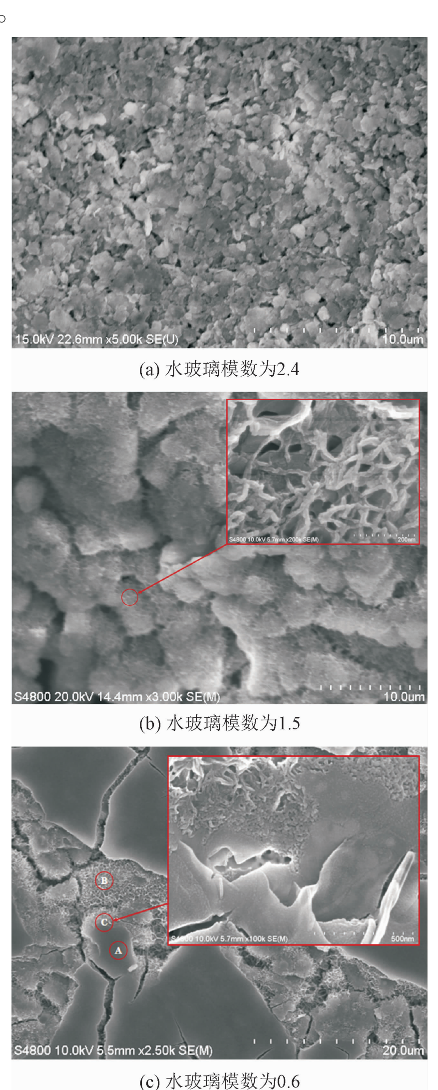


图 4　不同水玻璃模数的地聚物 X 射线衍射图谱

Fig. 4　X-ray diffraction pattern of geopolymer on different sodium silicate module

图 5 为地聚物再生骨料混凝土的 SEM 图片。从图 5(a)中可以看出,当水玻璃模数较高时(M = 2.4),地聚物内部的结构比较松散,这是由于高模数的水玻璃中 Na^+ 和 OH^- 含量不足,激发出的 Ca、Si 和 Al 离子不足而导致地聚物结构不完整。图 5(b)的水玻璃模数为 1.5,从图中可以看出,地聚物比图 5(a)更加密实,说明有更多的离子被激发出而使地聚物结构更加完整,而且通过局部放大(放大倍数为 20 万倍)的 SEM 图片可以看出,地聚物中存在大量

的网状结构，形成了类似图 2 中的 N-A-S-H 网状结构，这是由于随着水玻璃模数的降低，地聚物的水化产物中形成了更多的莫来石和类沸石，其整体结构也得到了加强。从图 5(c) 中可见，地聚物内部结构更加密实，可以明显看出地聚物表面由两种结构组成：区域 A 较为密实的层状结构，区域 B 为网状结构，区域 C 为两种结构的交界处，通过局部放大区域 C(放大倍数为 10 万倍) 可以发现两种结构紧密交织在一起，没有明显的分界线，两种凝胶状材料结合的非常紧密，而且其网状结构也比图 5(b) 中的密实，说明随着水玻璃模数的降低，地聚物中的结构更加致密。从地聚物的 SEM 分析中可知，随着水玻璃模数的降低，体系中的网状结构越发完整和紧密，这也证实了其力学强度随水玻璃模数降低而提升的试验结果。



(a) 水玻璃模数为2.4

(b) 水玻璃模数为1.5

(c) 水玻璃模数为0.6

图 5 不同水玻璃模数下的地聚物 SEM 图片

Fig. 5 SEM images of geopolymer with different sodium silicate modulus

2.2 水玻璃模数对强度标准差的影响

地聚物再生混凝土的骨料为再生骨料，其内部有大量原始裂纹和薄弱且不稳定的旧砂浆相；胶凝材料为地聚物，地聚物的主要成分为工业废渣，其性能不如水泥这种工业产品稳定。以上两点都会对地聚物再生混凝土的强度产生未知的影响，从而加大强度的离散性。图 6 为不同尺寸地聚物再生混凝土抗压强度标准差 σ。σ 值越大，混凝土强度的离散程度越大，《混凝土强度检验评定标准》(GB/T 50107—2010) 规定：对于强度等级 C20 以上的混凝土，$\sigma \leqslant 3.5$ MPa 为优秀，3.5 MPa $< \sigma \leqslant 5$ MPa 为一般，$\sigma > 5$ MPa 为差；对于强度等级 C20 以下的混凝土，$\sigma \leqslant 3$ MPa 为优秀，3 MPa $< \sigma \leqslant 4$ MPa 为一般，$\sigma > 5$ MPa 为差。

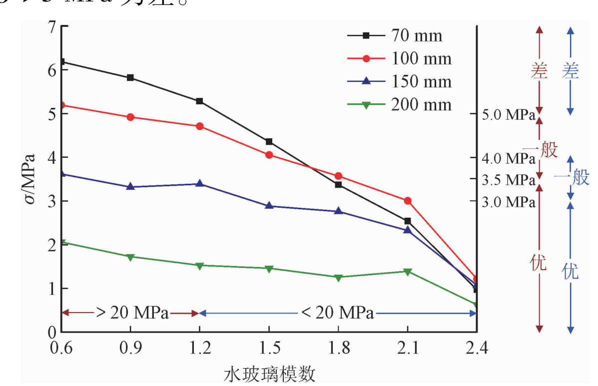


图 6 不同水玻璃模数和尺寸条件下的地聚物再生混凝土强度标准差

Fig. 6 Compressive strength standard deviation on different sodium silicate module and size effect

从图 6 中可以看出，当水玻璃模数为 0.6～1.2 时，地聚物再生混凝土的抗压强度都大于 20 MPa，此时，边长 200 mm 立方体试件的 σ 远小于 3.5 MPa；边长为 150 mm 立方体试件的 σ 在 3.5 MPa 左右摆动，其平均值略高于 3.5 MPa；边长为 100 mm 立方体试件的 σ 略低于5 MPa；边长为 70 mm 立方体试件的 σ 大于 5 MPa。说明尺寸越大，地聚物再生混凝土抗压强度的离散程度越小，而且只有当边长为 200 mm 时，地聚物再生混凝土立方体试块抗压强度的离散程度才为优秀；当边长为 150、100 mm 时，其抗压强度的离散程度为一般，也可以使用；当试件边长为 70 mm 时，其抗压强度离散性太大，不适合使用。当水玻璃模数为 1.2～2.4 时，地聚物再生混凝土的强度标准差逐渐降低，没有一组数据大于 5 MPa，说明在这个强度范围内，地聚物再生混凝土

都可以使用。

2.3　水玻璃模数对尺寸换算系数的影响

非标准尺寸试件与标准尺寸试件之间的力学性能的关系可以用尺寸换算系数 α 反映,利用尺寸换算系数 α,可以由非标准试件与标准试件力学参数中的任意一个计算出另外一个。由于《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定,边长为 150 mm 的立方体试件是标准试件,则其他非标准试件的换算系数为

$$\alpha_{70} = f_{cu,70}/f_{cu,150} \quad (1)$$

$$\alpha_{100} = f_{cu,100}/f_{cu,150} \quad (2)$$

$$\alpha_{200} = f_{cu,200}/f_{cu,150} \quad (3)$$

式中,$f_{cu,70}$、$f_{cu,100}$、$f_{cu,150}$、$f_{cu,200}$ 分别表示边长为 70、100、150、200 mm 的立方体试件抗压强度值。

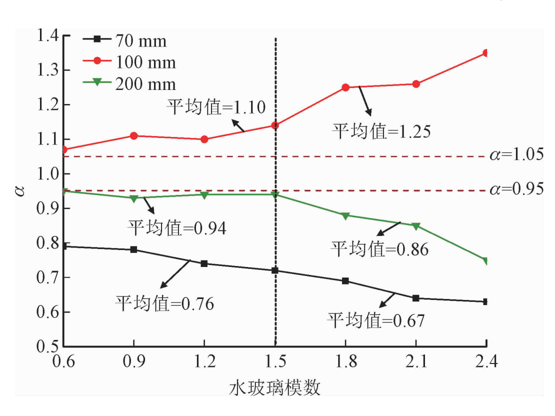


图 7　水玻璃模数对尺寸换算系数的影响

Fig. 7　Dimensional conversion factor on sodium silicate module

图 7 为水玻璃模数对地聚物再生混凝土尺寸换算系数的影响。根据《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定,边长为 200 mm 的立方体试件的尺寸换算系数为 1.05,边长为 100 mm的立方体的尺寸换算系数为 0.95(如图中虚线所示),图 7 中只有一个数据在 0.95 ~ 1.05,说明地聚物再生混凝土的尺寸换算系数不能参考普通水泥混凝土的标准,其原因与上一节地聚物再生混凝土强度离散性的分析一致,即地聚物和再生骨料的性能与水泥和自然石材不同,使其制备的混凝土也无法按照普通混凝土的相关标准进行限定。从图 7 中可以看出,水玻璃模数为 0.6 ~ 1.5 时,3 种尺寸试件的尺寸换算系数变化的比较平缓;水玻璃模数为 1.5 ~ 2.4 时,尺寸换算系数变化的非常剧烈。所以,采用分段式的方法计算地聚物再生混凝土的尺寸换算系数,分段点选择水玻璃模数为 1.5。本研究给出 2 种方法来进行地聚物再生混凝土尺寸换算系数的取值。第 1 种是平均数方法,即不同尺寸地聚物再生混凝土的尺寸换算系数为所得值的平均数;当 $0.6 \leqslant M < 1.5$ 时,$\alpha_{200} = 0.94$、$\alpha_{100} = 1.10$、$\alpha_{70} = 0.76$;当 $1.5 \leqslant M < 2.4$ 时,$\alpha_{200} = 0.86$、$\alpha_{100} = 1.25$、$\alpha_{70} = 0.67$。第 2 种方法采用线性拟合,将水玻璃模数(M)和尺寸换算系数(α)进行线性拟合,如图 8 所示。其结果为:当 $0.6 \leqslant M < 1.5$ 时,$\alpha_{200} = 0.790\,63 + 0.233\,05M$ ($R^2 = 0.956\,4$)、$\alpha_{100} = 1.029\,3 + 0.073\,7M$ ($R^2 = 0.888\,6$)、$\alpha_{70} = 0.943\,62 - 0.002\,44M$ ($R^2 = 0.999\,8$);当 $1.5 \leqslant M < 2.4$ 时,$\alpha_{200} = 0.845 - 0.083\,3M$ ($R^2 = 0.974\,0$)、$\alpha_{100} = 1.229\,51 - 0.192\,96M$ ($R^2 = 0.969\,9$)、$\alpha_{70} = 0.884\,2 - 0.109\,4M$ ($R^2 = 0.971\,4$)。

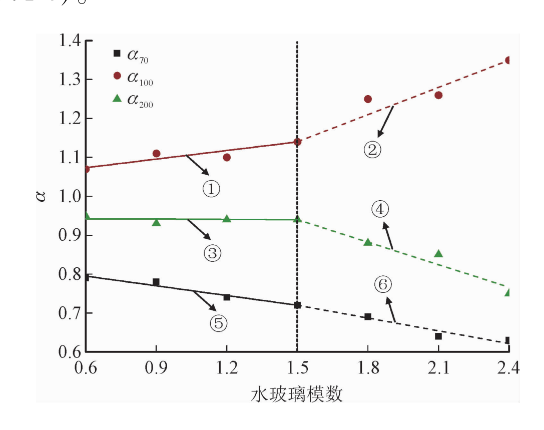


图 8　水玻璃模数与尺寸换算系数的拟合曲线图

Fig. 8　Fitted curve of dimensional conversion factor on sodium silicate module

2.4　BAŽANT 尺寸效应拟合

地聚物再生混凝土是一种准脆性材料,在荷载作用下裂缝扩展释放的应变能导致尺寸效应的存在,根据 BAŽANT[17] 的尺寸效应理论,提出了混凝土名义抗压强度与尺寸 D 之间的关系,即

$$f_N = f_\infty\left(1 + \frac{D_b}{D}\right) \quad (4)$$

式中:f_∞ 是地聚物再生混凝土尺寸无限大的名义抗压强度;D_b是边界层开裂有效厚度。经分解得

$$f_N = f_\infty + f_\infty \times \frac{1}{D} \times D_b \quad (5)$$

令 $X = 1/D$, $Y = f_N$, $C = f_\infty$, $A = f_\infty \times D_b$。则式(5)可变成线性方程,即

$$Y = AX + C \quad (6)$$

表 4 尺寸效应理论公式参数计算

Tab. 4 Factors of size effect theory

参数	水玻璃模数						
	0.6	0.9	1.2	1.5	1.8	2.1	2.4
斜率 A	29.788	24.396	19.115	12.841	6.655	5.069	0.713
截距 C	795.428	899.571	765.000	680.571	988.285	928.714	444.428
曲线拟合度 R^2	0.982 3	0.954 6	0.995	0.997 3	0.999 4	0.996 4	0.984 9

X 和 Y 均由试验得到的强度和试件尺寸直接计算得出,代入式(6)可以求出 A 和 C,最后得到尺寸效应的理论公式参数,如表 4 所示。此处需要说明的是,通过以上几节对地聚物再生混凝土抗压强度标准差 σ、尺寸效应度 $\Delta\alpha$ 的分析,发现边长为 70 mm的立方体试件的数据不符合规律,也对其原因进行了分析,即再生骨料粒径大小和其内部含有的原始缺陷对小尺寸试件的影响更为显著,所以为了排除其干扰,在此小节的计算中不采用边长为 70 mm的立方体试件数据。

图 9 为各尺寸的地聚物再生混凝土实测强度值与 BAŽANT 理论曲线的对比图。可知,在不同的水玻璃模数条件下,其抗压强度实测值都在理论曲线上(边长为 70 mm 立方体试件除外),说明地聚物再生混凝土抗压强度可以用 BAŽANT 理论进行计算,但是当试件尺寸过小时,如 70 mm,该理论并不适用。

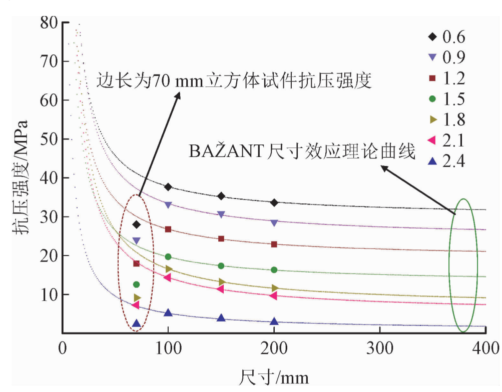


图 9 实测强度值与 BAŽANT 理论强度的对比图

Fig. 9 Comparison diagram of measured strength and BAŽANT theoretical strength

2.5 临界尺寸与临界强度

首先将尺寸效应相关数据进行无量纲化处理[17],如式(7)所示,再将不同尺寸地聚物再生混凝土抗压强度特征值试验数据代入式(7)进行数学回归分析,可解出无量纲的相关待定系数(式 8)。

$$\frac{f_N}{f_{150}} = \frac{f_\infty}{f_{150}}\left(1 + \frac{b}{D}\right) \tag{7}$$

式中:f_{150} 是边长为 150 mm 立方体试件的地聚物再生混凝土实测强度;b 为方程的待定系数。

$$\frac{f_N}{f_{150}} = 0.614\ 54 \times \left(1 + \frac{92.118\ 5}{D}\right),R^2 = 0.975\ 9 \tag{8}$$

水玻璃模数与 BAŽANT 理论曲线的无量纲关系图如图 10 所示。由图 10 可以看出,水玻璃模数 > 1.5 的情况下(1.8、2.1 和 2.4),尺寸效应负偏离于理论曲线;水玻璃模数 ≤ 1.5 的情况下(0.6、0.9、1.2 和 1.5),尺寸效应正偏离于理论曲线。通过上述分析可知,水玻璃模数为 1.5 是尺寸效应变化的分界点,因此提出采用分段函数的方式拟合水玻璃模数与 f_∞/f_{150} 和 D_b 关系的方法。图 11 为水玻璃模数与 f_∞/f_{150} 和 D_b 关系示意图,式(9)~(12)为拟合曲线公式。

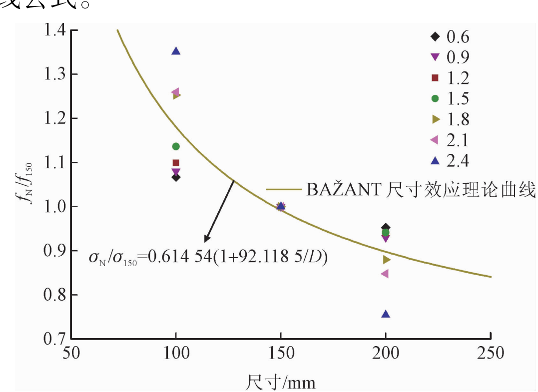


图 10 无量纲强度与 BAŽANT 理论强度的对比图

Fig. 10 Comparison diagram of dimensionless strength and BAŽANT theoretical strength

当 0.3 ≤ M ≤ 1.5 时

$$\frac{f_\infty}{f_{150}} = 0.902\ 69 - 0.167\ 21M,R^2 = 0.962\ 48 \tag{9}$$

$$D_b = 8.696\ 7 + 29.519M,R^2 = 0.973\ 1 \tag{10}$$

当 1.5 < M ≤ 2.4 时

$$\frac{f_\infty}{f_{150}} = 1.630\ 77 - 0.592\ 7M,R^2 = 0.974\ 1 \tag{11}$$

$$D_b = -687.442 + 493.031M, R^2 = 0.799\ 81 \tag{12}$$

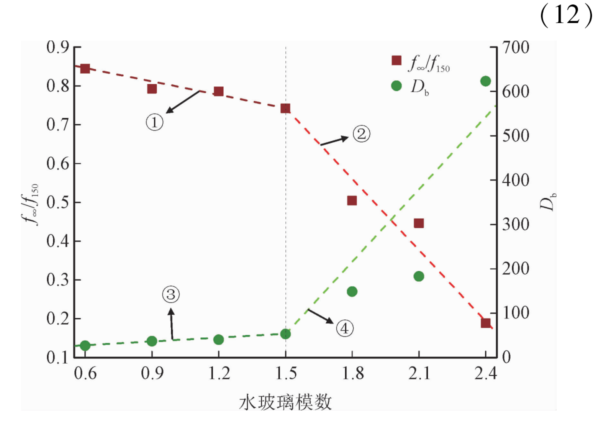


图 11　水玻璃模数与 f_∞/f_{150} 和 D_b 的关系

Fig. 11　Effect of sodium silicate module on f_∞/f_{150} and D_b

根据式(9)～(12)和图 11 分析，对于水玻璃模数与 f_∞/f_{150} 和 D_b 关系提出的分段函数具有较高的适用性，由此将式(9)～(12)分别代入式(7)，可以得到考虑尺寸效应与水玻璃模数耦合作用下的地聚物再生混凝土抗压强度尺寸效应的名义抗压强度预测方程，即

当 $0.3 \leqslant M \leqslant 1.5$ 时

$$\frac{f_N}{f_{150}} = (0.902\ 69 - 0.167\ 21M) \times \left(1 + \frac{29.519M + 8.696\ 7}{D}\right) \tag{13}$$

当 $1.5 < M \leqslant 2.4$ 时

$$\frac{f_N}{f_{150}} = (1.630\ 77 - 0.592\ 7M) \times \left(1 + \frac{493.031M - 687.442}{D}\right) \tag{14}$$

根据式(13)～(14)，可以推算出不同水玻璃模数条件下地聚物再生混凝土试件尺寸无限大时的临界强度特征值(f_{cr})，数据为：$f_{cr(0.6)} = 28.33$ MPa、$f_{cr(0.9)} = 23.16$ MPa、$f_{cr(1.2)} = 17.07$ MPa、$f_{cr(1.5)} = 11.28$ MPa、$f_{cr(1.8)} = 7.45$ MPa、$f_{cr(2.1)} = 4.396$ MPa、$f_{cr(2.4)} = 0.79$ MPa。考虑工程尺寸效应的适用范围，当名义抗压强度与临界尺寸特征值相差 5% 之内时，可以认为该名义抗压强度对应的地聚物再生混凝土试件的尺寸为临界尺寸(D_{cr})，则不同水玻璃模数条件下的地聚物再生混凝土的临界尺寸分别为：$D_{cr(0.6)} = 528$ mm、$D_{cr(0.9)} = 705$ mm、$D_{cr(1.2)} = 882$ mm、$D_{cr(1.5)} = 1\ 059$ mm、$D_{cr(1.8)} = 4\ 000$ mm、$D_{cr(2.1)} = 6\ 958$ mm、$D_{cr(2.4)} = 9\ 916$ mm。水玻璃模数与地聚物再生混凝土临界尺寸和临界强度关系如图 12 所示。式(13)～(14)所提出的预测方程可以有效地推导出地聚物再生混凝土在不同水玻璃模数条件下的临界强度和临界尺寸，而且具有更加广泛的适用性，主要体现在两个方面：①综合考虑了再生骨料掺量和尺寸效应耦合作用的影响，因此具有更高的适用性；②采用无量纲化方法对于预测其他强度等级和水玻璃模数的地聚物再生混凝土抗压强度具有一定的参考意义。

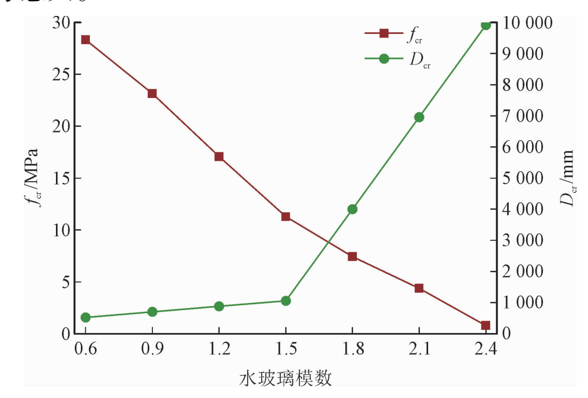


图 12　水玻璃模数与临界强度和临界尺寸的关系

Fig. 12　Effect of sodium silicate module on critical strength and critical size

3　结　论

1)地聚物再生混凝土的抗压强度值随着水玻璃模数的增加而降低，水玻璃模数过高(2.7)则地聚物胶凝材料不能凝结，无强度；玻璃模数过低(0.3)地聚物胶凝材料闪凝，也没有强度。

2)不同尺寸的地聚物再生混凝土抗压强度规律为：$f_{100} > f_{150} > f_{200} > f_{70}$。通过分析强度标准差发现，当地聚物再生混凝土强度大于 20 MPa 时，边长为 200 mm 的地聚物再生混凝土抗压强度的离散程度才为优秀；边长为 150、100 mm 的其抗压强度的离散程度为一般，也可以使用；边长为 70 mm 的不适合使用。

3)地聚物再生混凝土的换算系数不能采用《普通混凝土力学性能试验方法标准》(GB/T 50081—2002)中规定的换算系数。本研究给出两种方法来进行地聚物再生混凝土尺寸换算系数的取值：第 1 种是平均数方法，第 2 种采用线性拟合法。

4)边长为 200、150 和 100 mm 的地聚物再生混凝土立方体抗压强度均符合 BAŽANT 的尺寸效应理论曲线，采用无量纲的方法可以得到地聚物再生混凝土抗压强度与水玻璃模数和尺寸参数耦合作用影响的预测方程，所提出的方程具有更好的适用性，并

且得出了不同水玻璃模数条件下地聚物再生混凝土的临界尺寸和临界强度值。

参考文献:

[1] DAVIDOVITS J. 30 years of successes and failures in geopolymer applications. Market trends and potential breakthroughs [C]// Geopolymer 2002 Conference. Saint-Quentin-France: Geopolymer Institute, 2002: 1-16.

[2] 施惠生, 夏明, 郭晓潞. 粉煤灰基地聚合物反应机理及各组分作用的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2013, 41(7): 972-980.
SHI Huisheng, XIA Ming, GUO Xiaolu. Research development on mechanism of fly ash-based geopolymer and effect of each component[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2013, 41(7): 972-980(in Chinese).

[3] PROVIS J L. Geopolymers and other alkali activated materials: why, how, and what? [J]. Materials and structures, 2014, 47(1): 11-25.

[4] DAVIDOVITS J. Geopolymers: inorganic polymeric new materials [J]. Journal of thermal analysis, 1991, 37(8): 1633-1656.

[5] PERERA D S, VANCE E R, FINNIE K S, et al. Disposition of water in metakaolinite based geopolymers [M]//BANSAL N P, SINGH J P, KRIVEN W M. Advances in Ceramic Matrix Composites XI, Volume 175. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc, 2006: 225-236.

[6] 周静海, 何海进, 孟宪宏, 等. 再生混凝土基本力学性能试验[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2010, 26(3): 464-468.
ZHOU Jinghai, HE Haijin, MENG Xianhong, et al. Basic mechanical properties of recycled concrete experimental study[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University (natural science), 2010, 26(3): 464-468(in Chinese).

[7] 周静海, 刘丹, 董健飞. 废弃纤维再生混凝土的本构关系[J]. 混凝土, 2013(2): 54-58.
ZHOU Jinghai, LIU Dan, DONG Jianfei. Constitutive relation of waste fiber recycled concrete[J]. Concrete, 2013(2): 54-58(in Chinese).

[8] 肖建庄. 再生混凝土单轴受压应力-应变全曲线试验研究[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2007, 35(11): 1445-1449.
XIAO Jianzhuang. Experimental investigation on complete stress-strain curve of recycled concrete under uniaxial loading[J]. Journal of Tongji University (natural science), 2007, 35(11): 1445-1449 (in Chinese).

[9] 李佳彬. 再生混凝土基本力学性能研究[D]. 上海: 同济大学, 2004: 25-30.

[10] 丁兆洋. 无机矿物聚合材料的制备及其水化产物的研究[D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2011.

[11] 朱纯熙, 卢晨. 水玻璃硬化的认识过程[J]. 无机盐工业, 2001, 33(1): 22-25.
ZHU Chunxi, LU Chen. The progress to recognize the hardening mechanism of sodium silicate [J]. Inorganic chemicals industry, 2001, 33(1): 22-25(in Chinese).

[12] 朱纯熙, 卢晨, 季敦生, 等. CO_2 水玻璃砂硬化机理的认识过程[J]. 热加工工艺, 1998, 27(6): 46-47.
ZHU Chunxi, LU Chen, JI Dunsheng, et al. Process of understanding the hardening mechanism of CO_2 sodium silicate sand[J]. Hot working technology, 1998, 27(6): 46-47(in Chinese).

[13] RAHIER H, WASTIELS J, BIESEMANS M, et al. Reaction mechanism, kinetics and high temperature transformations of geopolymers [J]. Journal of materials science, 2007, 42(9): 2982-2996.

[14] PURDON A O. The action of alkalis on bast-furnace slag[J]. Journal of the Society of Chemical Industry, 1940, 59(9): 191-202.

[15] DUXSON P, FERNÁNDEZ-JIMÉNEZ A, PROVIS J L, et al. Geopolymer technology: the current state of the art[J]. Journal of materials science, 2007, 42(9): 2917-2933.

[16] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 混凝土结构工程施工质量验收规范: GB 50204—2015[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2015.

[17] BAŽANT Z P. Size effect[J]. International journal of solids and structures, 2000, 37(1/2): 69-80.

(编辑 李坤璐)